

Yüksek Gerilim Kablolarındaki İzolasyon Problemlerinin Elektrik Alan Dağılımına Etkisi The Effect of High Voltage Cable Insulation Problems On Electric Field Distribution

Celal KOCATEPE¹, Oktay ARIKAN¹, Celal Fadıl KUMRU¹, Orhan Doğan ORHAN¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi

kocatepe@yildiz.edu.tr, oarikan@yildiz.edu.tr, cfkumru@yildiz.edu.tr, odoğanorhan@gmail.com

Özet

Yüksek gerilim kabloları, elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan elemanlardır. Güç sistemlerinde önemli bir rol üstlenen bu kabloların tasarım ve imalatlarının aynı hassasiyetle yapılması gerekmektedir. Kablo imalatında yapılan hatalar ile malzeme yapısında meydana gelebilecek olan bozukluklar yaşlanma ve arızalara sebep olmaktadır. Özellikle yalıtkan malzeme içerisinde kalabilecek olan hava boşlukları, yabancı maddeler ve nem delinme ile sonuçlanabilecek yalıtım problemlerine sebep olabilmektedir. Bu çalışmada, yüksek gerilim kablolarının izolasyonunda, imalat hatası sebebiyle kalabilecek olan hava boşluklarının elektrik alan dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. 220 kV'luk yüksek gerilim kablosunun, yalıtkan tabakasında farklı koordinatlarda ve çaplarda hava boşluğu bulunması durumları göz önüne alınarak, elektrik alan dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada Finite Element Method Magnetics (FEMM) paket programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, boşluk çapının ve konumunun elektrik alan dağılımını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir.

Abstract

High voltage cables are the elements which widely used in electric energy transmission and distribution systems. The design and the production of these cables, which have a crucial role in power systems, must be made delicately. The structural defects in the materials caused by the processing errors result in aging and breakdown. Especially the cavities, foreign materials and the humidity in the insulation may cause to insulation problems result with the breakdown. In the present study, the effect of the cavities caused by the processing errors on electric field distribution is analyzed in a high voltage cable. The electricity field distribution of a 220 kV nominal rated high voltage cable is studied in the presence of cavity at different coordinates and different sizes. The analyses are carried out by using the packaged program named Finite Element Method Magnetics (FEMM) in the present study. As a result of the analyses conducted, it is

understood that cavity size and the cavity distance extensively affect the electric field distribution in the cable.

1. Giriş

Enerji üretim tesisleri ile tüketim tesislerinin genellikle birbirinden uzak olması sebebiyle, enerji iletiminin teknik ve ekonomik bakımdan en uygun şekilde yapılabilmesi için yüksek gerilime ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Yüksek mertebeli güçlerin uzun mesafeler boyunca verimli olarak taşınması ancak yüksek gerilim ile sağlanabilmektedir. Bu sebeple, güç sistemlerinde kullanılan yüksek gerilim ekipmanları tüm modern sistemlerin omurgası konumundadır [2]. Yüksek gerilim ile enerji iletimi genellikle havai hatlar ile yapılmaktadır. Ancak bazı fiziksel ve çevresel zorunluluklar (görüntü kirliliği, güvenlik, alan darlığı vb.) olduğu durumlarda yüksek gerilim kabloları tercih edilmektedir. Özellikle insan nüfusunun yoğun olduğu yerleşim bölgelerinde enerjinin taşınması gerektiği durumlarda büyük kolaylık, güvenlik ve enerji sürekliliği sağlamaktadır. Yüksek gerilim kablolarının işletmede sağlıklı bir şekilde kullanılabilmesi için ana izolasyon malzemesinin de kaliteli olarak üretilmesi gerekmektedir [3].

Ana izolasyon tabakası, yüksek gerilim kablosunun en önemli katmanıdır ve bu malzemenin kalitesi kablo ömrünü direk olarak etkilemektedir [4]. Buna ek olarak, izolasyon içerisindeki yabancı maddelerin, boşlukların ve bunlara bağlı olarak oluşan kısmi deşarjların da kablo ömrü üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir [5,6,7]. Literatürdeki birçok çalışmada, izolasyon içerisindeki boşlukların kısmi deşarj ve kablo ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kablo içerisinde bulunan hava boşluklarının maruz kaldığı elektrik alanın, havanın delinme dayanımını geçmesiyle birlikte kısmi deşarj meydana gelir. Bu deşarj, izolasyon malzemesinin bozulmasına ve buna bağlı olarak da tüm sistem için tehlike oluşturabilecek tam delinmenin gerçekleşmesine sebep olabilmektedir [2].

Bu çalışmada, 220 kV nominal gerilimli, tek damarlı bir yüksek gerilim kablosunun ana izolasyonu içerisinde bulunan farklı koordinat ve çaplardaki hava boşlukları için elektrik

alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada FEMM paket programı kullanılmıştır.

2. Yöntem

2.1. Analitik Yöntem

Yüksek gerilim tekniğinde kullanılan analitik çözümlerde, en önemli problemlerden biri de Laplace ve Poisson denklemlerinin çözümlerini gerektiren elektrik alan analizleridir [4]. Özellikle karmaşık geometriye sahip durumlarda, analitik olarak çözüm yapmak oldukça zorlaşmaktadır.

Yüksek gerilim kabloları silindrsel bir yapıya sahiptir ve analizleri için silindrsel elektrot sisteminin alan denklemleri kullanılmaktadır. Denklem (1)'de silindrsel elektrot sistemi için elektrik alan ifadesi verilmiştir.

$$E = \frac{1}{r} \cdot \frac{U_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

Burada r elektrik alan değeri hesaplanmak istenen yarıçapı, r_1 iletken yarıçapını, r_2 kablo siperinin yarıçapını ve U_0 ise kablo-siper (toprak) arası gerilimi ifade etmektedir.

İzolasyon malzemesi içerisinde bulunan hava boşluğu ise genellikle küresel yapıdadır. Dolayısı ile hava boşluğu içerisindeki elektrik alanın hesaplanması, küresel koordinatlardaki Laplace denkleminin çözümünü gerektirir. Bilindiği gibi küresel koordinatlardaki Laplace denklemi r, θ ve Φ 'e bağlıdır. Burada r küre yarıçapını, θ ve Φ ise eksenel açı değişimlerini ifade etmektedir. Ancak hava boşluğu çapı, eksenel simetriye sahip kablo çapına göre oldukça küçüktür. Dolayısıyla küresel koordinatlardaki Laplace denklemi, sadece r ve θ 'a bağlı olan iki boyutlu Laplace denklemine dönüşür.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) = 0 \quad (2)$$

Görüldüğü üzere yukarıda verilen iki boyutlu Laplace denklemini analitik olarak çözümü zordur. Ancak hava boşluğu içindeki elektrik alan değerini yaklaşık olarak veren ifade denklem (3) de verilmiştir [2].

$$E_c = \left(\frac{3 \cdot \epsilon_d}{\epsilon_c + 2 \cdot \epsilon_d} \right) \cdot E_d \quad (3)$$

Burada, E_c , boşluk içerisindeki elektrik alanı, E_d , izolasyon malzemesindeki elektrik alanı, ϵ_d , izolasyon malzemesinin bağlı dielektrik sabitini ve ϵ_c ise boşluktaki malzemenin bağlı dielektrik sabitini ifade etmektedir.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

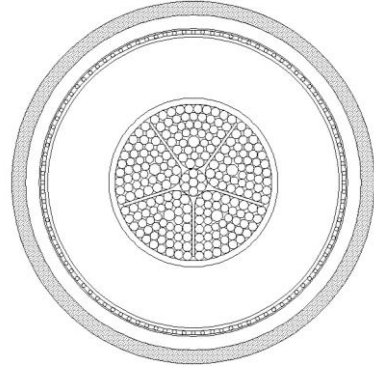
Sonlu elemanlar yöntemi, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem, elektrik veya magnetik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanmaktadır. Bölge içerisindeki alan,

Laplace ve Poisson tipinde bir elektrik veya magnetik alan olabilir. Sonlu elemanlar yönteminde de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün, sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir. Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü, aşağıda sıralanan beş adımda gerçekleştirilir [8],

- Problem geometrisi, materyal özellikleri ve sınır koşullarının belirlenmesi,
- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması,
- Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü

3. Analiz

Bu bölümde, FEMM paket programı kullanılarak elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz için, 220 kV nominal gerilime sahip, sektör iletkenli, XLPE izoleli ve tek damarlı yüksek gerilim kablosu kullanılmıştır.



Şekil 1: Analizi yapılan kablonun kesit görünümü

Analizi yapılan yüksek gerilim kablosunun kesit görünümü Şekil 1'de ve kabloya ait teknik veriler, Çizelge-1'de verilmiştir.

Çizelge-1: Çalışmada kullanılan kablo parametreleri

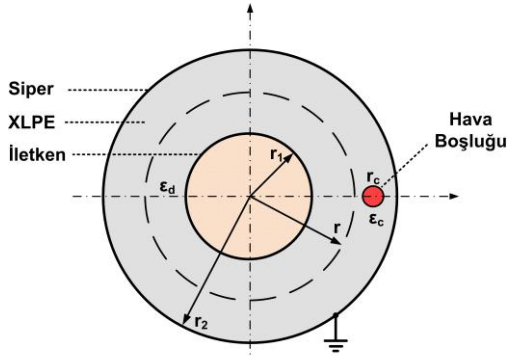
Kablo Parametreleri	Değer
Nominal Gerilim	220 kV
İletken Kesiti	1x2000 mm ²
İletken Çapı	56,5 mm
İç Yarı-iletken Kalınlığı	1,6 mm
XLPE İzolasyon Kalınlığı	22 mm
Dış Yarı-iletken Kalınlığı	1,2 mm
Bakır Siper Kalınlığı	1,36 mm
Dış Kılıf Kalınlığı	5 mm
Direnç (20°C)	<0,00903 Ω/km
XLPE bağlı dielektrik sabiti	2,3
Havanın bağlı dielektrik sabiti	1

Yapılacak analiz çalışması için iki farklı senaryo belirlenmiştir:

Senaryo-1: Hava boşluğunun yarıçapı sabit iken, boşluk konumunun değişken olması.

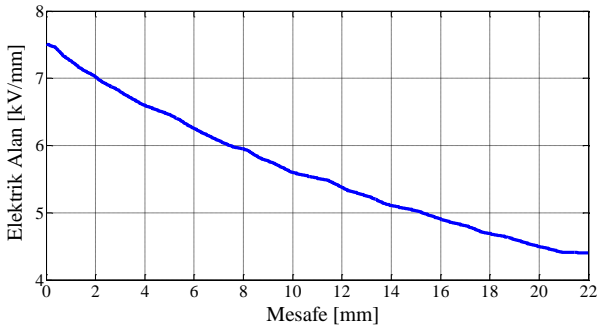
Senaryo-2: Hava boşluğunun konumu sabit iken, yarıçapın değişken olması.

Her iki senaryo için kullanılacak olan kablunun kesit görünümü ve kablo içerisindeki hava boşluğu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: Çalışmada kullanılan kablunun kesit görüntüsü

Şekil 2'de verilen yüksek gerilim kablusunun izolasyonunda herhangi bir hava boşluğu yokken elde edilen elektrik alan dağılımı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: İzolasyon içerisinde hava boşluğu olmadığı durumda elektrik alan dağılımı

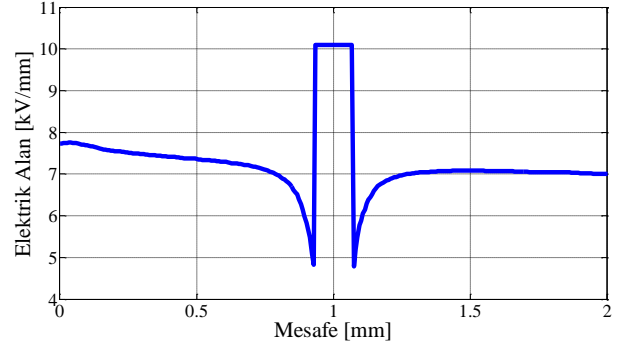
Şekil 3'den de görüldüğü üzere, bir yüksek gerilim kablusundaki elektrik alan dağılımı logaritmiktir. İzolasyon içerisindeki elektrik alan şiddeti yarıçap ile ters orantılı olarak değişmektedir.

3.1. Senaryo-1

Bu bölümde, kablo izolasyonu içerisinde sabit çapta, silindrsel geometriye sahip ve farklı koordinatlarda hava boşluğu bulunması durumundaki elektrik alan dağılımı incelenmiştir. Hava boşluğunun yarı çapı $r=0,07$ mm olarak alınmıştır ve analizler silindrsel koordinat düzleminde gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, sonlu eleman olarak üçgen eleman kullanılmıştır. Üçgen elemanın minimum açısı $33,4^\circ$ olarak seçilmiş ve 48995 adet sonlu eleman kullanılmıştır.

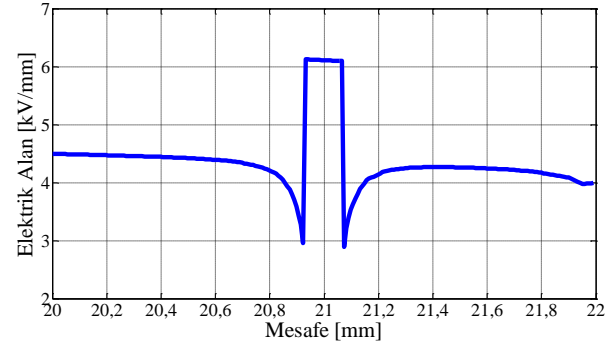
Şekil 4'de, hava boşluğu merkezinin, iletken 1 mm uzaklıkta olması durumundaki alan dağılımı verilmiştir. Alan dağılımı lineer bir şekilde devam ederken, hava boşluğunda lineerlik bozulmuş ve elektrik alan şiddeti hava boşluğu içerisinde 10,12 kV/mm değerine ulaşmıştır. Bu artışın sebebi, havanın bağıl dielektrik sabitinin (ϵ_{rhava}), XLPE malzemeye

göre (ϵ_{XLPE}) oldukça düşük olmasıdır. Hava boşluğu içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti, havanın delinme alan şiddetinden (3 kV/mm) oldukça büyüktür. Dolayısıyla, izolasyon içerisinde bulunan hava boşluğunda kısmi deşarj oluşacak ve elektrik alan değeri sıfıra düşecektir. Bu çalışmada, hava boşluğu içerisindeki elektrik alan şiddetinin belirlenmesi amaçlandığı için, boşluk içerisinde oluşabilecek kısmi deşarjlar ihmal edilmiştir.



Şekil 4: İletkenden 1 mm uzaklıkta bulunan hava boşluğu içerisindeki elektrik alan dağılımı

Aynı çaptaki hava boşluğunun, iletken 21 mm mesafede olması durumunda ki elektrik alan dağılımı Şekil 5'de verilmiştir.



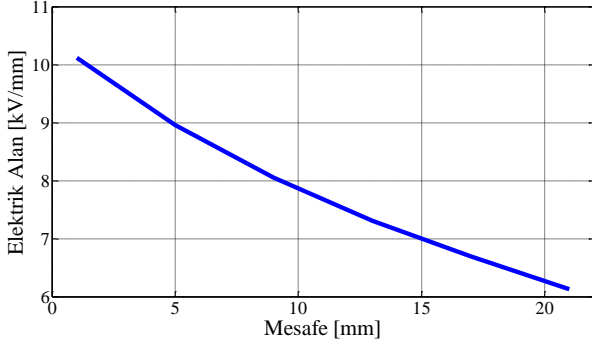
Şekil 5: İletkenden 21 mm uzaklıkta bulunan hava boşluğu içerisindeki elektrik alan dağılımı

Şekil 5'de görüldüğü üzere, iletken 21 mm uzaklıktaki mesafede bulunan hava boşluğu içerisindeki elektrik alan şiddeti değeri 6,13 kV/mm değerine ulaşmıştır. Bu değer de havanın delinme alan şiddetinden büyüktür. İzolasyon içerisinde, sabit çapta ve farklı koordinatlarda hava boşluğu olması durumunda elde edilen maksimum elektrik alan şiddeti değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2: $r=0,07$ yarıçapta farklı koordinatlarda bulunan hava boşlukları içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değerleri

Mesafe [mm]	1	5	9	13	17	21
Maks. Elektrik Alan [kV/mm]	10,12	8,96	8,05	7,31	6,69	6,13

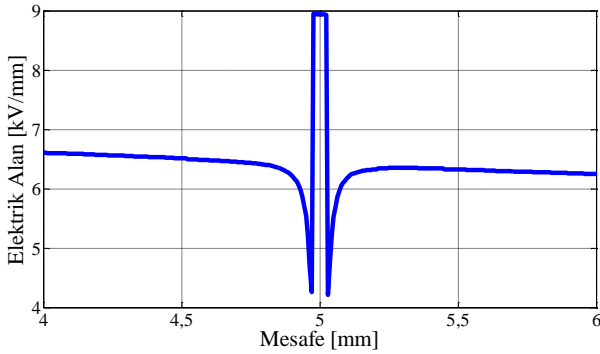
Yapılan simülasyon sonuçlarına bakıldığında, hava boşluğu içerisindeki elektrik alan şiddetinin iletkeneye yakın noktalarda yüksek olduğu ve iletkeneden uzak noktalarda ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak en uzak durumda dahi, hava boşluğu içerisinde tam delinme ile sonuçlanabilecek kısmi deşarj olayları gerçekleşmektedir. Bu sebeple, izolasyon içerisindeki hava boşluğunun yeri büyük önem arz etmektedir. Çizelge 2'de verilen hava boşlukları içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değerlerinin, iletkeneye olan uzaklık ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Hava boşluğu içerisindeki maksimum elektrik alan şiddetinin iletkeneye olan uzaklık ile değişimi

3.2. Senaryo-2

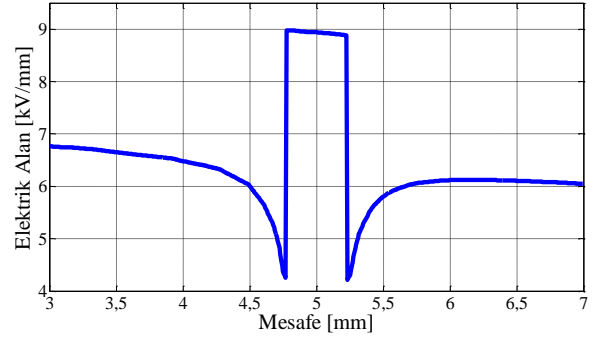
Bu bölümde, kablo izolasyonunda sabit bir nokta seçilmiş ve hava boşluğunun çapı değiştirilerek elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Hava boşluğunun iletkeneye olan uzaklığı 5 mm olarak seçilmiştir. Bu noktada, hava boşluğunun yarıçapı $r=0,03$ mm iken boşluk içerisindeki elektrik alan dağılımı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7: İletkeneden 5 mm uzaklıkta, $r=0,03$ mm yarıçaplı hava boşluğu içerisindeki elektrik alan dağılımı

Burada, hava boşluğu içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değeri 8,95 kV/mm değerine yükselmiştir. Önceki analizlere benzer olarak burada da havanın delinme alan şiddeti değeri aşılmıştır. Bu sebeple, imalat aşamasında izolasyon malzemesinin olabildiğince homojen ve içerisinde bulunan boşluk çaplarının da olabildiğince küçük olması gerekmektedir. Aksi halde izolasyon malzemesinde ısınma, delinme ve erken yaşlanma olayları gözükabilir.

Hava boşluğu çapının elektrik alan dağılımı üzerindeki etkisinin tam olarak görülebilmesi için, hava boşluğunun yarıçapı $r=0,23$ mm değerine yükseltilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, boşluk içerisindeki elektrik alan dağılımı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: İletkeneden 5 mm uzaklıkta, $r=0,23$ mm yarıçaplı hava boşluğu içerisindeki elektrik alan dağılımı

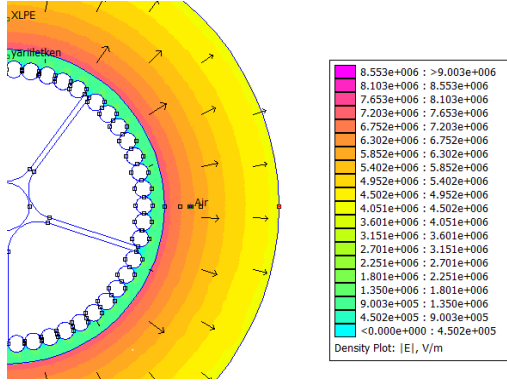
Yarıçapın $r=0,23$ mm olduğu durumda, hava boşluğu içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti 9 kV/mm olarak hesaplanmıştır. Bu elektrik alan değeri, yarıçapın daha küçük olduğu ilk durumdaki değere oldukça yakındır. Dolayısıyla yarıçap değişiminin hava boşluğu içerisindeki maksimum alan şiddetine etkisi oldukça azdır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, yarıçapın artmasıyla birlikte kısmi deşarj meydana gelen hacmin de artmasıdır. Daha büyük yarıçaplarda meydana gelen kısmi deşarj olayı malzemenin daha kısa sürede bozulmasına ve yaşlanmasına sebep olmaktadır.

Çizelge 3'de, sabit noktada ve farklı yarıçaplardaki hava boşlukları içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değerleri verilmiştir.

Çizelge 3: İletkeneye 5 mm mesafede bulunan farklı yarıçaplardaki hava boşlukları içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değerleri

Yarıçap [mm]	0,03	0,13	0,23	0,33	0,43	0,53
Maks. Elektrik Alan Şiddeti [kV/mm]	8,951	8,965	8,983	9,059	9,067	9,075

Çizelge 3'de görüldüğü üzere, yarıçap değişimi ile birlikte hava boşluğu içerisindeki maksimum alan şiddeti yavaş bir şekilde artmaktadır. Bu artışın az olmasının sebebi, hava boşluğunun boyutlarının, kablo boyutları yanında çok küçük kalmasıdır. Analizi yapılan yüksek gerilim kablosunun ve hava boşluğunun geometrisi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9: Analizi yapılan yüksek gerilim kablosundaki elektrik alan dağılımı

Gerçek uygulamalarda da, izolasyon içerisindeki hava boşluğu boyutları kablo boyutlarına göre küçük kalacağı için, çok büyük çaplardaki analizler gerçekleştirilmemiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 220 kV nominal gerilimli, XLPE izoleli ve tek damarlı bir yüksek gerilim kablosu için elektrik alan analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, kablo izolasyonu içerisinde farklı koordinat ve çaplarda hava boşluğu bulunması durumu için gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, hava boşluğu içerisindeki alan şiddetinin, iletkene olan uzaklığa bağlı olarak değiştiği görülmüştür. İletkene yakın noktalarda boşluk içerisindeki alan şiddetinin yüksek olduğu, uzak noktalarda ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, boşluk içerisindeki alan şiddetinin değeri de önem arz etmektedir. Boşluk içerisindeki maksimum elektrik alan şiddeti değerinin, boşluk malzemesinin delinme dayanımından küçük olması gerekmektedir. Aksi halde, boşluk içerisinde kısmi boşalma ve buna bağlı olarak ısınma, delinme ve erken yaşlanma olayları meydana gelmektedir. Hava boşluğu çapının da malzeme ömrü üzerinde etkisi bulunmaktadır. Boşluk çapı, maksimum alan şiddeti değerini çok fazla etkilememektedir. Ancak boşluk çapının büyük olması, kısmi deşarjın daha büyük bir alanı tahrip etmesine ve buna bağlı olarak da malzemenin hızlı bir şekilde yaşlanmasına sebep olmaktadır.

Sonuç olarak, yüksek gerilim kablo izolasyonlarının ve yüksek gerilime maruz kalan yalıtım malzemelerinin üretimlerinin özenle yapılması gerekmektedir. Enerji verimliliğinin ve sürekliliğinin büyük önem taşıdığı günümüzde, yüksek gerilim elemanlarından optimum şekilde faydalanmak için üretim öncesi ar-ge çalışmalarına öncelik verilmelidir. İzolasyon malzemesi içerisindeki farklı türde, farklı geometrilerde ve farklı sayıdaki yabancı maddelerin incelenmesi ve analizlerinin gerçekleştirilmesi ileride yapılacak çalışmalarda gerçekleştirilebilir.

5. Kaynaklar

- [1] Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., Arkan, O., *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*, Birsen Yayınevi, 2005.
- [2] Al-Arainy, A. A., Qureshi, M. I., Malik, N. H., *Fundamentals of High Voltage Engineering*, Academic Publishing and Press, Saudi Arabia, 2005.
- [3] Kuffel, J., Kuffel, E., Zaengl, W. S., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Newnes, 2000.
- [4] Lachini, S., Gholami, A., Mirzaie, M., "Determining Electric Field Distribution in High Voltage Cable In Presence of Cavity", *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2010, pp 1-7
- [5] H.N.O.T.R.; Phung, B.T.; Zhang, H.; Khawaja, R.H.; R. H. Khawaja, "Investigation of Electric Field Distribution In Power Cables With Voids", *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp 637-640, June 2006.
- [6] Stancu, C. Notingher, P. V. Ciuprina, F. Notingher Jr., P. Castellon, I. Agnel, S. Toureille, A. , " computation of the electric field in cable insulation in the presence of water trees and space charge", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 45, No. I, pp. 30-43, January/February 2009.
- [7] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina "P. Notingher jr, S. Agnel, I.Castellon, A. Toureille , " Electric Field Computation in Water Treed Polyethylene With Space Charge Accumulation", *Conference on International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 186-189, 11-14 June 2006.
- [8] Kalenderli, Ö., *Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi*, İTÜ, 1997.